



Universidad
Zaragoza



Facultad de Ciencias
Universidad Zaragoza

TRABAJO DE FIN DE GRADO
GRADO EN FÍSICA

Módulo educativo sobre rayos cósmicos utilizando el entorno “RestSoft”

Autora:

Cristina Moreno Gómez de Segura

Directoras:

Gloria Luzón

Theopisti Dafni

Facultad de Ciencias
Universidad de Zaragoza

Resumen

El presente trabajo es la exposición de una página web creada con fines educativos [1]. El tema tratado teóricamente durante el trabajo son los rayos cósmicos, centrándose posteriormente en los muones creados a partir de estos y la detección de los mismos. Se expone también una herramienta, RestSoft, para realizar simulaciones de rayos cósmicos. Mediante el uso práctico de estas simulaciones se pretende comprobar la validez de la teoría además de dar un punto de vista diferente a la física de partículas.

Summary

This work is the exhibition of a website created for educational purposes [1]. The topic theoretically addressed during the work are cosmic rays, subsequently focusing only on the muons created by them and the detection of such particles. A tool, RestSoft, is also on display to perform cosmic ray simulations. By using these simulations practically, it is intended to check the validity of the theory in addition to giving a different point of view to particle physics.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Módulo educativo	1
2. Motivación y objetivos	3
3. Fundamento Teórico	4
3.1. Introducción	4
3.2. Rayos cósmicos primarios: origen y espectro	5
3.2.1. Cascadas	8
3.3. Muones	8
3.3.1. Interacción con la materia	9
3.4. Detección	12
4. Metodología	15
4.1. Página web	15
4.2. Entorno RestSoft	15
4.2.1. Simulaciones	16
5. Resultados	19
6. Conclusiones	23
Bibliografía	24
Apéndice	I
A. Códigos utilizados	I

1. Introducción

Durante el grado de Física existen muy pocas herramientas para entender tanto los rayos cósmicos como para aprender a realizar simulaciones y ser capaces de analizarlas. La motivación de este trabajo reside en poder crear una herramienta que permita a los alumnos obtener estos conocimientos [1].

Es un proyecto innovador cuyo objetivo es introducir al alumno de manera sencilla y atractiva en la física de partículas y en el mundo de las simulaciones.

Para realizar este trabajo, primeramente se han estudiado las diferentes estructuras utilizadas en guías didácticas para poder así utilizar el formato más adecuado según el nivel y el tema de este proyecto. Segundo, se ha realizado un estudio de la teoría del tema a tratar, rayos cósmicos.

A continuación, hubo que familiarizarse con el entorno RestSoft para poder ser capaces de crear una explicación lo suficientemente sencilla para una persona sin conocimientos previos. Posteriormente, se han realizado diferentes simulaciones y análisis de datos para comprobar que todo lo deseado funciona correctamente. Por último, se ha diseñado una página web mediante la herramienta Google Sites poniendo a disposición todo lo aprendido anteriormente.

1.1. Módulo educativo

Un módulo educativo es una herramienta interactiva que contiene todo lo necesario para el aprendizaje de un tema sin necesidad de un profesor presencial. El estudiante va avanzando en el módulo adquiriendo conocimientos al ritmo que él desee o crea conveniente.

Un módulo educativo debe tener una estructura clara y ordenada y, aunque puede variar según el caso, en general se compone de: una introducción al módulo dejando claros los objetivos, un desarrollo teórico del contenido, una actividad práctica y una evaluación. A esto se le pueden añadir distintos apartados que lo hagan más completo.

Dentro de la introducción al módulo se puede añadir, además de los ya mencionados objetivos, otros apartados como una sugerencia de un tiempo estimado para realizar cada apartado o una especificación de los conocimientos previos necesarios para realizar con éxito el módulo, entre otros.

El apartado de desarrollo teórico, se debe hacer de una manera que atraiga al estudiante. Puede estructurarse, por ejemplo, en distintos archivos no muy grandes de manera que no sean muy pesados de leer y así conseguir que el alumno permanezca motivado para continuar con el módulo y no perder su interés.

En este módulo educativo en concreto se encuentra como forma práctica una herramienta para realizar simulaciones, el entorno RestSoft. De esta manera, el estudiante puede analizar el problema desde un acercamiento dinámico, permitiéndole así comprender más fácilmente los aspectos tratados en el apartado teórico.

Se espera que, de este modo, si el estudiante observa de primera mano el fenómeno físico en cuestión y puede interaccionar con el modelo, la efectividad en el aprendizaje sea superior a varias clases de teoría donde se requieren unas matemáticas muy complejas.

Los módulos educativos interactivos se han ido desarrollando y poniendo en práctica bastante durante los últimos años, lo que ha permitido observar tanto sus ventajas como desventajas [2].

Tal y como se ha mencionado previamente, mediante esta herramienta el propio alumno decide su ritmo de aprendizaje, siendo generalmente mayor al ritmo utilizado en una clase normal. Esto es positivo ya que permite aprender en menos tiempo pero existe el riesgo de que lo aprendido esté incompleto o se haya hecho de una manera superficial.

Este tipo de aprendizaje está creado para ser realizado de forma individual, resultando muy útil para actividades complementarias. El uso de estos materiales es positivo siempre que no se utilicen en gran exceso, ya que una de las tareas formativas de cualquier proyecto docente es el trabajo en grupo. Por ese motivo el profesor siempre puede proponer actividades colaborativas o un uso del módulo desde diferentes perspectivas.

El hecho de que únicamente se necesite un ordenador y acceso a internet para poder realizar este tipo de cursos, permite una enseñanza a distancia mucho más sencilla gracias a la flexibilidad de horarios y la no necesidad de encontrarse en un sitio concreto. El único inconveniente en este aspecto reside en los insuficientes controles de calidad que se realizan sobre estos cursos. Estos controles sí que se realizan en enseñanza reglada, por lo que no supondría un inconveniente en este caso.

También se ha comprobado que, mediante estos cursos, en ocasiones los estudiantes buscan estrategias de mínimo esfuerzo que les haga cumplir el objetivo desatendiendo a las grandes posibilidades que les ofrece el curso, lo que implica que en cursos de este tipo las actividades de evaluación deben estar muy bien diseñadas.

Como última gran desventaja se puede añadir que, en muchas ocasiones los programas utilizados no funcionan en distintos ordenadores, impidiendo el buen uso del material creado. Por esta razón siempre es conveniente que exista un contacto (profesor) que pueda ayudar a solucionar este tipo de inconvenientes.

A pesar de las desventajas que presentan este tipo de módulos educativos, se cree y se ha comprobado que son una muy buena herramienta complementaria en el aprendizaje de un tema. El hecho de que requiera un uso interactivo continuo con el ordenador hace que el alumno permanezca activo en todo momento. Si además, el tema tratado es de interés para el alumno, éste se encontrará motivado lo que implicará que dedique más tiempo al estudio del mismo.

2. Motivación y objetivos

En varias ocasiones, a la hora de aprender un concepto nuevo en lugar de centrarse en el propio concepto se realiza el estudio desde un punto de vista muy matemático resultando a veces difícil para el alumno ya que las matemáticas utilizadas son complejas. Por esa razón, mediante la utilización de un módulo educativo y haciendo uso de las simulaciones, se espera que los conceptos lleguen mejor al alumno. Más adelante, siempre hay oportunidad de indagar en las matemáticas que existen detrás.

Asimismo, durante el grado de Física no se mencionan los rayos cósmicos en ninguna asignatura. Se ha decidido llevar un estudio sobre los rayos cósmicos, para posteriormente, crear el módulo sobre este tema ya que se ha considerado que puede ser un tema que de interés para los alumnos. Además, como no se ha tratado este tema con anterioridad, se han intentado explicar todos los conceptos de una forma sencilla para que sea fácilmente comprensible.

En este caso se ha realizado un módulo educativo en una página web de internet, por lo que no se requiere la presencia de un profesor, tal y como ya se ha mencionado anteriormente. El objetivo principal es crear varios módulos educativos como el que aparece en la presente memoria, que se podrían implementar posteriormente a una asignatura sobre física de partículas y astropartículas que podría ofertarse en la plataforma OCW (Open Course Web).

Cómo este es el primer módulo que se crea, puede ser conveniente utilizarlo como una práctica en alguna asignatura del grado para comprobar la efectividad del mismo, antes de proponer nuevos módulos con diferentes temáticas. Se podría utilizar, por ejemplo, en Astronomía y Astrofísica o en Física Nuclear y de Partículas o en Tecnología Nuclear, entre otras asignaturas del Grado de Física.

Además, en uno de los apartados de la página web se ha creado un test, con idea de que el propio alumno lo realice para ser consciente de lo aprendido y de lo que sería conveniente volver a leer. Sin embargo, también podría utilizarse como forma de evaluación.

3. Fundamento Teórico

3.1. Introducción

Actualmente, se sabe que los rayos cósmicos son partículas subatómicas cargadas relativistas provenientes del espacio que bombardean constantemente nuestra atmósfera desde todos los ángulos y direcciones posibles. De hecho, existe gran interés en investigar sobre los rayos cósmicos, pero, ¿por qué?

Resulta que, gracias a los estudios realizados sobre rayos cósmicos hasta la fecha, se han conseguido grandes avances científicos y tecnológicos. Se podría decir que el estudio de los rayos cósmicos tiene su inicio en la introducción del concepto de ionización. A partir de ese punto se realizaron grandes descubrimientos, como el hallazgo del electrón o el muón descubiertos gracias a la cámara de niebla. Además, esto permitió identificar por primera vez las propiedades de las partículas (dirección, velocidad, momento y signo de la carga).

Gracias a la cámara de ionización se descubrió la ionización de fondo que existía en la Tierra, lo que condujo a preguntarse por el origen de esta radiación. Llevando a los científicos así, tras varios años y mediante diferentes experimentos con electros copios en globos aerostáticos, al descubrimiento de que esa radiación provenía del cosmos, dando lugar a los conocidos hoy en día como rayos cósmicos.

Una vez se supo de la existencia de esta radiación de fondo que provenía del espacio exterior, se comenzó a investigar la composición, origen y consecuencias de ésta. Hasta la fecha, se sabe que estos dependen tanto de la altitud como de la latitud, lo que conlleva, y se pudo verificar gracias a la invención del contador Geiger-Müller, a que son partículas cargadas que se ven afectadas por el campo magnético de la Tierra, encontrando más radiación en los polos que en el ecuador. Durante el estudio de estos rayos también se descubrió el positrón, la primera antipartícula, lo que confirmaba la teoría cuántica de Dirac ¹.

Como se puede comprobar, el estudio de rayos cósmicos ha tenido una importancia crucial en el desarrollo de la física de partículas elementales o física de altas energías. Hoy en día, gracias a los estudios en rayos cósmicos podemos calcular las dosis de radiación que reciben algunas personas, como pilotos o astronautas, y poder conocer los riesgos a los que están expuestos, evitando así dosis excesivas.

También se cree que pueden tener una gran repercusión en la climatología de la Tierra, concretamente en el proceso de formación de nubes. Hace un tiempo se sugirió que el proceso de formación de nubes podría estar relacionado con la intensidad de los rayos cósmicos. La idea es que la formación de gotas se ve

¹La teoría cuántica que Dirac dice que para cada partícula debe existir una antipartícula con propiedades estáticas idénticas.

influenciada por la ionización de moléculas atmosféricas causada por los rayos cósmicos. Desde el año 2000 se lleva a cabo el experimento CLOUD (Cosmic Leaving Outdoor Droplets) en el CERN con el objetivo de estudiar la influencia que pueden tener los rayos cósmicos en la formación de núcleos de condensación.

Por el momento no se ha conseguido ninguna ventaja económica o tecnológica usando rayos cósmicos, exceptuando los avances tecnológicos desarrollados para su investigación. Sin embargo, se han hecho avances en el estudio de sus efectos en el clima, atmósfera y la salud, posibilitando un mayor tráfico aéreo o estancias espaciales más prolongadas de astronautas.

Algunas aplicaciones prácticas en la que se han utilizado directamente estos rayos han sido diferentes estudios como por ejemplo del interior de volcanes y pirámides mediante tomografías con muones o sobre la actividad de la central nuclear de Fukushima tras su explosión.

Resumiendo, tal y como dice Manuel Aguilar [3], “El estudio de los denominados rayos cósmicos, ha sido determinante para la Física de Partículas Elementales, aunque desde el punto de vista astrofísico ha propiciado, hasta la fecha, más preguntas que respuestas”.

El gran interés que surge por estudiar los rayos cósmicos de sucesos poco probables, es decir, los de ultra-alta energía (10^{18} eV), viene por el hecho de que pueden revelar nuevas partículas aún sin descubrir o que nos traigan información de estructuras y composición del Universo.

3.2. Rayos cósmicos primarios: origen y espectro

Las partículas de los rayos cósmicos bombardean nuestra atmósfera con un flujo promedio de unas $1000 \text{ partículas}/m^2 \cdot s$, aunque el flujo de la cantidad de partículas que llegan a la atmósfera también varía según su energía. Tal y como se puede apreciar en la figura 1, esta dependencia del flujo con la energía en la región de 10^{11} - 10^{20} eV, se puede parametrizar como una ley de potencias:

$$\frac{dN(E)}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (3.1)$$

Siendo γ la pendiente. Se pueden observar varios cambios en el índice espectral ocurriendo el primero alrededor de $3 \cdot 10^{15}$ eV y se le denomina “knee” (rodilla). El segundo ocurre alrededor de $2 \cdot 10^{17}$ eV y se denomina “second knee” (segunda rodilla) y el tercero alrededor de $3 \cdot 10^{18}$ eV y se denomina “ankle” (tobillo). Tal y como se puede apreciar claramente en la figura 1, las partículas con mayor energía son las menos comunes, los denominados “sucesos raros” [3].

Las partículas con menor energía (unos 10^{10} eV) provienen del Sol. Los rayos cósmicos

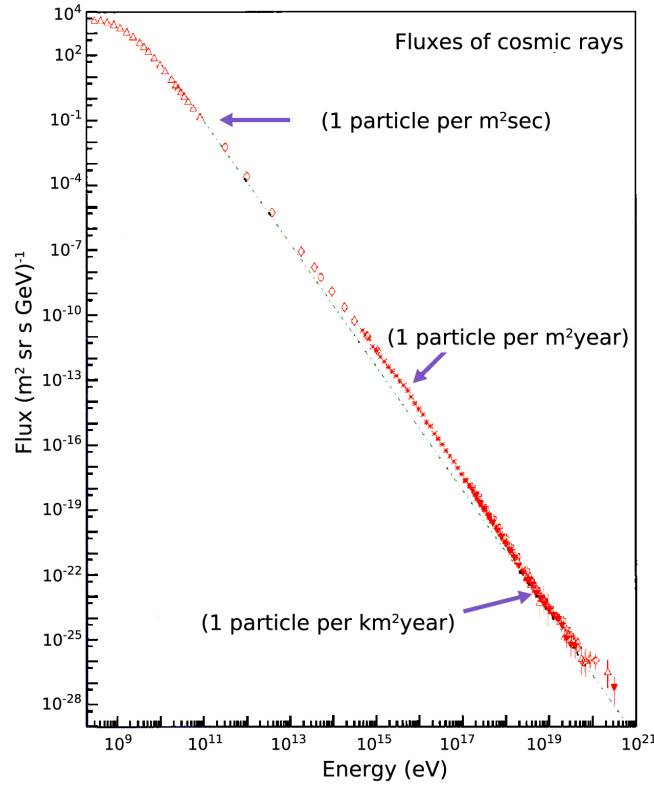


Figura 1: Flujo de partículas en función de su energía [3].

micos son un problema menor cuando el Sol está activo ya que la Heliosfera ² es más fuerte y por tanto nos ayuda a protegernos de los rayos cósmicos galácticos y extragalácticos [4]. Los rayos cósmicos provenientes de la galaxia tienen una energía superior (entre 10^{10} eV y 10^{15} eV). Estas partículas se cree que provienen de supernovas, agujeros negros y estrellas neutrónicas³.

Por último, podemos llegar a encontrar partículas con energías ultrarelativistas (de hasta 10^{20} eV). No se sabe con exactitud de dónde provienen ya que, todavía no se conoce ninguna fuente en el Cosmos que pueda llegar a producir esa cantidad de energía. Sin embargo, se estima que el origen de estas partículas se encuentra fuera de nuestra galaxia.

En cuanto a la composición de los rayos cósmicos, estos están formados principalmente por neutrones y protones, alrededor de unos 90% protones, 9% partículas alfa y el resto (1%) son partículas pesadas ionizadas y electrones. De hecho, si

²La Heliosfera es la región espacial que se encuentra bajo la influencia del viento solar y su campo magnético

³Las estrellas neutrónicas son la etapa final de vida de una estrella muy masiva. Cuando una de estas estrellas se queda sin combustible nuclear, el núcleo empieza a colapsar hasta que la superficie de la estrella choca contra el núcleo donde estalla a modo de supernova. Después, lo que queda es el núcleo colapsado: la estrella neutrónica y si la estrella es muy masiva puede llegar a quedar un Agujero Negro [5].

comparamos las abundancias relativas de los diferentes elementos en los rayos cósmicos y en el sistema solar (figura 2), vemos que no son tan distintas. Ambas distribuciones muestran picos correspondientes al carbono, nitrógeno, oxígeno y grupo del hierro, lo que podría indicar que las partículas que forman los rayos cósmicos han sido aceleradas a partir de material con parecida composición química y abundancias a las que hay en el sistema solar [3].

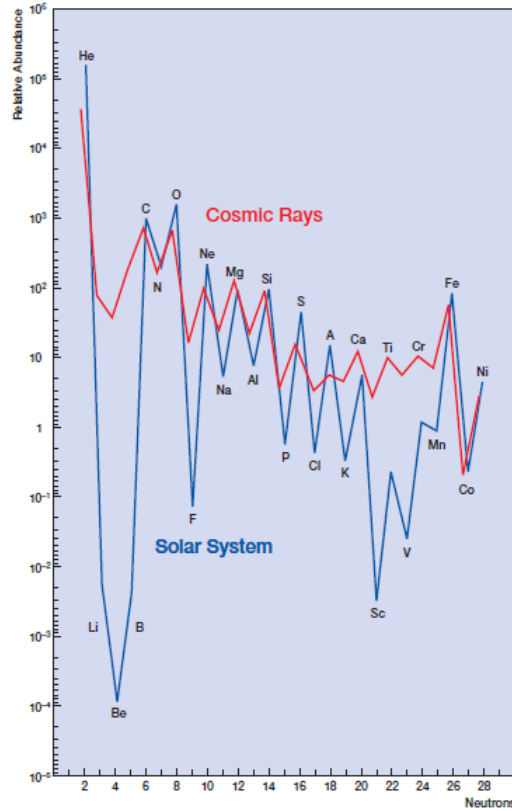


Figura 2: Abundancias relativas en rayos cósmicos y en el sistema solar [4].

Si nos fijamos en la figura 2, vemos que no todas las abundancias son iguales, existiendo dos grupos en los que los elementos son mucho más abundantes en los rayos cósmicos que en el sistema solar, siendo por un lado Li, Be y B y por otro Sc, V y Mn. Después del primer grupo se encuentra el grupo C, N, O que son elementos más pesados, pero más abundantes y tras el segundo grupo se encuentra el Fe también con más abundancia. Esto puede sugerir que ambos grupos son creados a partir de colisiones entre elementos inicialmente acelerados y partículas que se encuentran en el espacio. Para que esto sea posible, los rayos cósmicos han tenido que viajar atravesando materia hasta llegar hasta nosotros, permitiéndonos así deducir su edad y la distancia recorrida. En promedio se cree que esta distancia es mayor que nuestra Galaxia, concluyendo que los rayos cósmicos siguen un camino a través de campos magnéticos. Lo que además concuerda con un origen de protones de hasta 10^{15} eV e iones de hasta 10^{18} eV en nuestra Galaxia [6].

3.2.1. Cascadas

Una vez estas partículas energéticas, rayos cósmicos, chocan con la atmósfera terrestre, se crean los llamados rayos cósmicos secundarios, y estos se componen de piones, kaones y mesones. Las partículas, según avanzan en la atmósfera, se van desintegrando en otras partículas, creando así las conocidas “cascadas” de rayos cósmicos que llegan a la superficie de la Tierra. Es decir, las “cascadas” son el resultado de la interacción de una partícula primaria (partícula energética que llega del espacio exterior) con las moléculas de la atmósfera [7].

En la primera colisión, se crean mayormente piones y kaones. Cada una de estas partículas puede volver a interactuar con otro núcleo de la atmósfera creando más piones y kaones, cada vez de menor energía, creando así la denominada segunda colisión. Tanto los piones y kaones de la primera colisión como los de la segunda, empiezan a decaer antes de poder volver a interactuar con nada ya que son partículas inestables.

Los kaones decaen a muones, piones, rayos gamma y neutrinos mientras que los piones cargados pueden desintegrarse en fotones (rayos gamma), muones y neutrinos. Generalmente los muones creados llegarán hasta la superficie de la Tierra sin interactuar con nada, aunque también pueden decaer, por ejemplo, en un electrón y neutrino. Por su parte, los rayos gamma son estables y probablemente vuelvan a interactuar creando más partículas como por ejemplo produciendo pares (electrón-positrón). Por último, los neutrinos más probablemente no vuelvan a interactuar con nada en todo el Universo, pasando de largo por la Tierra.

Varias de las partículas creadas podrían tener una gran energía, tanta que llevarán una velocidad superior a la de la luz en el aire. Si estas partículas se encuentran cargadas, crearán la llamada radiación de Cherenkov⁴ [8].

De todas estas partículas creadas en las cascadas las más interesantes de estudiar y en las que se va a centrar este trabajo son los muones. El hecho de que, de las partículas creadas por rayos cósmicos, los muones sean los más abundantes que se encuentran en la superficie de la Tierra los hace un buen candidato a estudiar. Además de que, mediante el estudio y detección de los muones, se han podido realizar diferentes experimentos como el IceCube o el ATLAS.

3.3. Muones

El muón es una partícula elemental con la misma carga que el electrón, siendo positiva la de su antipartícula (el antimuón), pero con una masa 207 veces más

⁴La radiación Cherenkov es un tipo de radiación electromagnética producida cuando una partícula cargada se propaga en un medio con una velocidad mayor a la velocidad la luz en ese medio.

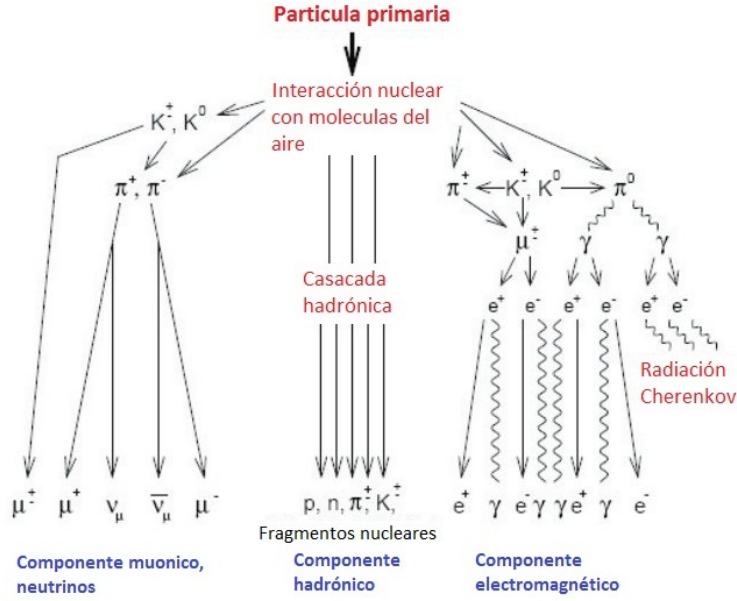


Figura 3: Esquema de las cascadas de rayos cósmicos [9].

grande que el electrón. Es un leptón y no es una partícula estable, ya que tiene una vida media de $2.2\mu s$.

Son las partículas cargadas más abundantes que podemos encontrar en la superficie de la Tierra de las provenientes del espacio exterior, con un flujo de aproximadamente de 1 muón por $cm^2 \cdot s$. Esta es una de las razones por la que estudiamos los muones a la hora de analizar los rayos cósmicos.

Debido a la gran cantidad de energía necesaria para crear muones, sabemos que no existe en la Tierra ninguna reacción nuclear natural que pueda producirlos. Lo que implica que los muones que encontramos en la Tierra de forma natural, provienen de los rayos cósmicos, concretamente de las cascadas formadas por estos. Estas cascadas pueden ser hadrónicas o leptónicas, siendo en las hadrónicas donde podemos detectar muones de alta energía [10].

3.3.1. Interacción con la materia

Una de las propiedades que más pueden interesar sobre los muones es su interacción con la materia, ya que conociéndola se puede decidir qué materiales conviene utilizar en un detector.

Los muones pueden decaer naturalmente o pueden interactuar con algún núcleo al entrar en el detector. El decaimiento de los muones se muestra a continuación:

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (3.2)$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e \quad (3.3)$$

Otra de las características que más se estudian en la detección de los muones es su poder de frenado. En la figura 4 podemos ver el poder de frenado que tienen los muones en cobre. Sabiendo el poder de frenado en el material que se está utilizando en el detector y el espesor del mismo, se puede calcular la cantidad de energía que depositarán estas partículas.

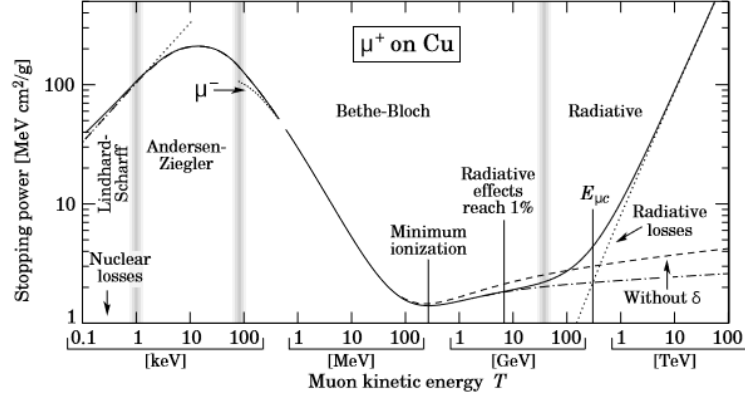


Figura 4: Poder de frenado de antimuones en cobre en función de la energía cinética [11].

En este proyecto nos centramos únicamente en los muones de muy alta energía, donde los procesos radiativos son más importantes que la ionización del resto de partículas cargadas. Existe una energía, denominada energía crítica ($E_{\mu c}$), a partir de la cual ocurre este fenómeno. Para muones y piones esta energía suele estar alrededor de unos cientos de GeV [12]. Los muones que llegan a nivel del mar tienen una energía alrededor de 4 GeV pero los que se estudian en laboratorios llegan a unos pocos cientos de GeV. Al laboratorio subterráneo de Canfranc, por ejemplo, llegan aproximadamente muones de 200 GeV. Como consecuencia de superar la energía crítica, a estas energías no podemos tratar la pérdida de energía de manera uniforme y continua. Por lo tanto, escribimos el promedio de la pérdida de los muones de muy alta energía como:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = a(E) + b(E) \cdot E. \quad (3.4)$$

Donde $a(E)$ es la pérdida por ionización dado por la ecuación de “Bethe equation” que describe la energía promedio de partículas pesadas cargadas moderadamente relativistas:

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left(\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 T_{max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right). \quad (3.5)$$

Y $b(E)$ es la pérdida de energía debida a procesos radiativos; concretamente es la suma de la producción de pares electrón-positrón, bremsstrahlung y contribuciones

fotonucleares, es decir:

$$b(E) = b_{brems} + b_{pair} + b_{nucl}. \quad (3.6)$$

Los muones van a pasar por un detector, por lo que podemos relacionar el espesor del material, la energía que deposita el muón y la energía que tenía en el momento de su producción. No nos vamos a centrar en esto ya que luego no utilizamos esta información en la parte práctica, pero sí que se puede encontrar una explicación más amplia en la página web creada en el documento de muones [1].

Generalmente, $a(E) \approx 2 \text{ cm}^2/\text{g}$ y $b(E)$ tiene un valor muy pequeño, tal y como se puede ver en la figura 5, lo que implica que sólo serán significativas las contribuciones de los procesos radiativos cuando se traten energías muy altas, ya que este término viene multiplicado por la energía, ecuación 3.4.

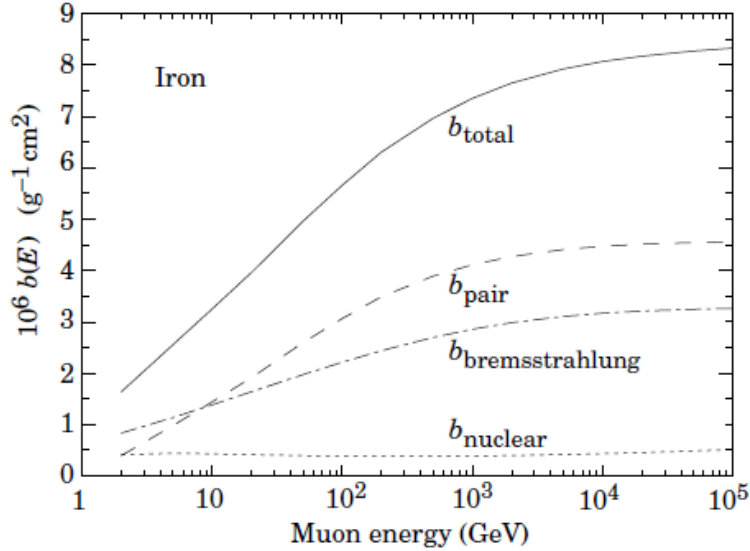


Figura 5: Pérdida de energía de muones debida a $b(E)$ en el hierro [11].

El poder de frenado que se ha utilizado en realidad viene dado como el poder de frenado másico, esto es, a la hora de tabular datos, es mucho más útil utilizar una cantidad que no dependa de la densidad del material, por eso viene en unidades de $\langle \frac{dE}{dx} \rangle = [(MeV \cdot \text{cm}^2)/g]$. Por consiguiente, se debe tener en cuenta esta dependencia con la densidad a la hora de realizar cualquier cálculo que implique el poder de frenado.

Además, para detectores de moderado espesor, como es el que se ha simulado, la probabilidad de pérdidas de energía se ajusta bastante bien a una distribución de Landau [13]. Lo que posteriormente nos permite saber cómo de buenos son los datos simulados.

3.4. Detección

Las primeras observaciones de rayos cósmicos se realizaron mediante cámaras Wilson. La primera cámara de niebla de Wilson hacía uso de un pistón para enfriar el aire y que el vapor de agua en el interior de la cámara empezara a condensarse en los iones resultantes de una partícula cargada. Más adelante, se añadió un gradiente térmico y una mezcla de alcohol que quedaba en estado metaestable y se condensaba al paso de partículas cargadas. Mediante la diferencia de potencial que se crea entre ambos, se puede visualizar la traza e intentar deducir el número de iones formados en la ionización.

Sin embargo, estas cámaras responden únicamente a muones generados por incidencia de protones muy energéticos. Por lo que, como estas cámaras solo podían detectar una pequeña parte de los rayos cósmicos, el siguiente paso fue construir monitores de neutrones y colocarlos en observatorios en puntos altos de la Tierra debido a que se descubrió que con la altitud el flujo de partículas que se pueden obtener aumenta, ya que se han desintegrado menos y han perdido menos energía en la atmósfera [4].

La cámara de niebla supuso un enorme avance e incluso hoy en día podemos encontrarlas, aunque para detectar partículas hoy se utilizan las mejoradas cámaras de burbujas. La cámara de niebla consiste en una caja donde se encuentra un gas fácilmente ionizable, de manera que cuando las partículas cargadas atraviesan el gas, lo ionizan y estos iones se condensan dando lugar a las trazas visibles [14]. Es relativamente sencillo construir una de estas cámaras, en la siguiente referencia viene explicado paso a paso [15].

Años después, se inventó el contador Geiger-Müller mediante el cual se puede contar el número de partículas detectadas. A partir de estos dos grandes inventos, se ha ido avanzando rápidamente en el estudio y detección de estas partículas. Uno de los proyectos más importantes existentes hoy en día en la detección de los rayos cósmicos muy energéticos es el Proyecto Pierre Auger.

Para detectar muones se induce la interacción de estos con un material de comportamiento conocido y luego se estudian los productos creados en la colisión. Para detectar muones se utilizan mayormente los llamados detectores de coincidencia, figura 6.

Estos, se componen de dos detectores colocados uno encima del otro y tal y como su nombre indica, solo recogen la señal cuando detectamos un pulso en ambos detectores en un periodo de tiempo menor del asignado. Los muones, gracias a la energía que llevan, traspasan sin problema el primer detector siguiendo prácticamente una línea recta, llegando así al segundo detector. En cambio, otras partículas del fondo no pasarán por ambos detectores, reduciendo de esta manera

la probabilidad de detectar radiación de fondo que no interesa.

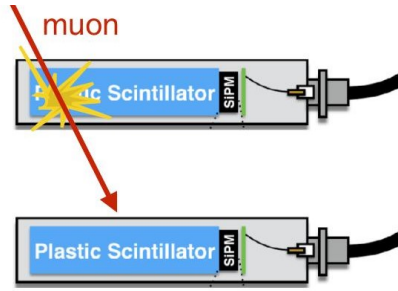


Figura 6: Esquema de un detector de muones [16].

Hoy en día se utilizan detectores de muones como parte de diferentes experimentos. En el CERN, se utilizan cámaras de muones en varios proyectos como por ejemplo en el experimento ATLAS. Este es un proyecto que tiene forma de cilindro y está construido a base de capas, es decir, como si fuera una cebolla. La cámara de muones se encuentra en la última capa de este ya que estos son capaces de atravesar todas las anteriores debido a su gran energía. Estas cámaras permiten identificar los muones creados mediante las desintegraciones de partículas masivas creadas en las colisiones de protones.

Al colisionar dos protones de muy alta energía, creamos muchas partículas distintas, entre otros bosones Z y bosones de Higgs. El bosón Z, junto con los bosones W son los intermediarios de la fuerza de interacción débil. El bosón Z es neutro lo que implica que se desintegra en una partícula y una antipartícula. Tiene 24 posibles formas de desintegración, de las cuales 3 no somos capaces de ver ya que se desintegran en neutrinos. En cambio, sí que podemos observar entre otros, sus desintegraciones a muon-antimuón.

Además, el bosón de Higgs también se desintegra en partículas conocidas. En la figura 7 vemos las proporciones de desintegración de un bosón de Higgs a una energía dada. Se han observado con más facilidad las desintegraciones ZZ , $\gamma\gamma$ y $W^+ W^-$ independientemente de que sus probabilidades sean más bajas que las desintegraciones $b\bar{b}$, ya que estas producen unos “jets” de partículas muy difíciles de separar de los normales. La desintegración del Bosón de Higgs en ZZ , nos lleva luego a 2 electrones y 2 positrones, lo que puede ser lo mismo a 2 muones y 2 antimuones, siendo esta la señal que interesa detectar [17].

En conclusión, la probabilidad de obtener una señal de muones y antimuones es bastante baja, pero teniendo en cuenta la cantidad de intentos que se realizan, en varias ocasiones encontraremos estas señales. La gran ventaja de esta señal es que es imposible confundirla con otra, lo que la hace muy útil a la hora de decidir si almacenar los datos o no.

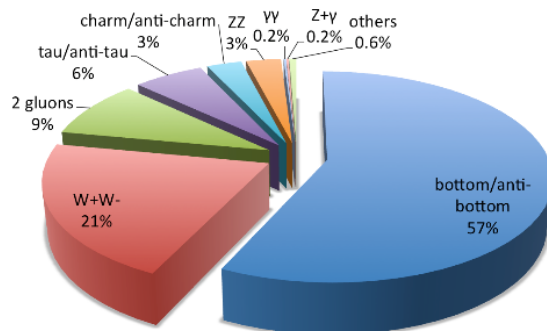


Figura 7: Proporciones de desintegración de un bosón de Higgs de 125 GeV [17].

Otro de los proyectos actuales en el que se utilizan detectores de muones es en el observatorio de neutrinos IceCube, cuyo objetivo es ser capaz de detectar neutrinos de origen cósmico y de muy alta energía. Para ello, se han colocado detectores en un kilómetro cúbico de hielo en la Antártida, a unos 2000 metros de profundidad.

Los neutrinos, son partículas subatómicas carentes de carga eléctrica, que apenas tienen masa, y que interactúan débilmente con la materia. Son capaces de viajar a velocidades muy altas, próximas a la velocidad de la luz y son muy atractivos para el estudio, ya que, al no tener carga, no pueden ser perturbados por campos magnéticos en su propagación. Esto significa que seguirán trayectorias rectas desde su emisión hasta su detección, lo cual nos proporcionará información sobre los mecanismos y las fuentes que los han producido. El problema es que, al no interactuar apenas con la materia, son muy difíciles de detectar.

Sabemos que los piones cargados de los rayos cósmicos se desintegran: $\pi \rightarrow \mu + \nu_\mu$ y el muón se desintegra en $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-$, lo que nos lleva a que, por interacciones de la atmósfera, se produzcan dos neutrinos muónicos y un neutrino electrónico. El IceCube se encarga entre otras muchas cosas de diferenciar entre estos dos tipos de neutrinos [18].

Esto es de gran interés porque puede comparar el flujo que llega desde la atmósfera y el que llega después de atravesar la Tierra. La proporción 2 neutrinos muónicos a 1 electrónico se cumple para los primeros mientras en el segundo caso, parte de los neutrinos muónicos han desaparecido (debido a las oscilaciones).

Los neutrinos muónicos, al chocar con el oxígeno o hidrógeno presente en el hielo, producen muones de unas energías muy elevadas (igual con los electrónicos). Gracias a esta energía, los muones viajan por el medio con una velocidad superior a la de la luz en este medio, creando así radiación Cherenkov. Cuando estas partículas desaceleran hasta la velocidad de la luz en el medio, se crea un cono de luz detectable. El cono creado por el muón está muy bien definido mientras que el cono creado por el neutrino electrónico, es difuso, debido a que el neutrino

electrónico al mismo tiempo que crea el cono produce una lluvia de electrones, que crean cada uno su propio cono [19].

La posibilidad de diferenciar los sabores de neutrinos midiendo la radiación Cherenkov fue utilizada inicialmente por Super-kamiokande en 1998 para comprobar la oscilación de los neutrinos muónicos (Premio Nóbel de 2015) [20]. En ambos experimentos se utilizan los muones para detectar o tener información de los neutrinos.

4. Metodología

4.1. Página web

Para crear el módulo educativo se ha optado por utilizar Google Sites. Esta es una aplicación diseñada por Google que permite crear y diseñar páginas web. Se ha optado por esta opción ya que es una aplicación sencilla y clara de utilizar además de muy fácil de compartir y hacerla pública.

A la hora de publicar la página web existe la posibilidad tanto de compartirla con todo el mundo como con un número de personas en concreto. Además, esta aplicación permite la visualización tanto en ordenadores, tablets o smartphones.

El formato utilizado a la hora de crear la página web tiene como objetivo guiar al alumno de la mejor manera posible a lo largo del tema tratado. Antes de comenzar con el curso se exponen los objetivos de este y luego se prosigue con la teoría sobre los rayos cósmicos, muones y detectores. Una vez se entiende lo explicado en teoría, el alumno pasa a leer la parte práctica, las simulaciones.

Cuando el alumno considera que comprende como realizar las simulaciones avanza a realizar los ejercicios propuestos, tras la finalización de los cuales encontrará un test de autoevaluación donde podrá comprobar lo aprendido hasta el momento. Para finalizar el curso, existe un apartado de “Extras”, donde el alumno que esté interesado podrá encontrar páginas y proyectos actuales relacionados con el tema [1].

4.2. Entorno RestSoft

El entorno RestSoft es un software colaborativo creado en la Universidad de Zaragoza en el grupo de Física Nuclear y de Partículas. Es un código específico que se ocupa de simulaciones, tomas de datos y análisis de resultados. Utiliza Geant4 [21] para realizar las simulaciones de interacciones de partículas con distintos materiales y está basado en el lenguaje C++ y en ROOT [22]. Además, es utilizado para la investigación en diferentes experimentos, así como para simulaciones de distintos procesos físicos.

El software ROOT es una herramienta de gran utilidad en física, en concreto en el estudio de física de partículas. Nacido en 1994, ha sido desarrollado en el CERN donde continuamente se siguen realizando actualizaciones. Ofrece todo lo necesario para tratar el procesamiento de big data, análisis estadístico y la visualización y almacenamiento de datos [22].

El programa Geant4 es un conjunto de herramientas para realizar simulaciones de detectores y sobre interacciones de partículas atravesando materia. Se utiliza principalmente en la física de altas energías, pero también tiene una gran utilidad en la física nuclear, física de aceleradores, física de “sucesos raros”, física médica o física del espacio y radiación.

Geant4 permite describir y crear la geometría que más convenga según el detector deseado, especificando el material, volumen y posiciones de cada uno de los componentes, así como del blindaje, si se quiere utilizar. También permite decidir qué partículas elementales se van a lanzar decidiendo tanto su masa, momento, polarización, etc [21].

Una vez lanzada la simulación con la aplicación restG4, Geant4 proporciona información sobre las trayectorias de las partículas y las diferentes interacciones ocurridas, dando también información sobre las partículas nuevas creadas, si las hay. Se puede ver el espectro de energías que las partículas han depositado en el volumen del detector o la distribución angular con la que llegan, por ejemplo. Además, permite visualizar los eventos ocurridos dentro del detector, concluyendo así, mediante esta información, poder describir el funcionamiento de detectores [23].

Tras lanzar la simulación, obtenemos distintos eventos caracterizados por hits, es decir, pequeños depósitos de energía. Mediante el uso de la aplicación restManager y archivos de configuración, los eventos formados por Geant4, TRestG4Event, se procesan en el entorno RestSoft. Este entorno añade características del detector y del plano de lectura y se guardan en diferentes estructuras de datos como por ejemplo TRestHitsEvent, el cual son conjuntos de depósitos de energía, o TRestTrackEvent, el cual son agrupaciones de hits cercanos en trazas.

Además, para cada estructura de eventos se puede realizar un análisis donde se obtienen distintos observables como la energía depositada en el volumen activo, número de hits en cada dirección, número de trazas, distancia entre el evento y el suelo del detector, entre otros.

4.2.1. Simulaciones

Se han realizado varias simulaciones con el entorno descrito. En ellas, se han ido haciendo variaciones tanto de los materiales introducidos como de las dimensiones

de la geometría, siempre manteniendo una caja cuadrada.

Esto se ha hecho con el objetivo de aprender y entender los códigos utilizados, (los cuales se pueden encontrar en los anexos). Así como para ser capaces de explicarlos de manera que guíen al alumno a poder realizar simulaciones por su cuenta sin ayuda ni necesidad de un profesor. En la página web creada se puede encontrar el documento explicativo creado para realizar las simulaciones en el apartado de "Práctica"[1].

Además de realizar la simulación de datos, se ha tenido que hacer un pequeño análisis de los mismos. No podemos lanzar una simulación y no comprobar que los datos obtenidos son coherentes y correctos. Se puede comprobar mediante la visualización en 3 dimensiones si han ocurrido sucesos o no, pero no se dispone de información suficiente para poder afirmar si los datos son correctos.

Para realizar la comprobación de los datos se ha utilizado la gráfica de la energía depositada por los muones en el volumen activo del detector. Antes de realizar la simulación se puede calcular teóricamente el punto donde se va a encontrar el pico de energía. Para calcular esto, mediante el enlace [24], que también está incluido en la página web, se pueden encontrar los poderes de frenado de distintos materiales. Además, sabiendo el espesor del detector utilizado y sin olvidar la densidad del mismo podremos calcular de manera muy sencilla la energía depositada en MeV.

$$E_{depositada} = \left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle \cdot \rho \cdot x \quad (4.1)$$

Se ha realizado como ejemplo el caso de la utilización de un plástico centelleador (BC408) y un detector de 5 cm. Al realizar la operación se obtiene $E_{depositada} = 10.3 \text{ MeV}$. Viendo la figura 8, el pico de energía ocurre alrededor de los 10 MeV lo que implica que los datos son correctos. Además, se realiza el ajuste a una curva de Landau a la cual se ajusta con bastante precisión tal y como se ha predicho en la teoría.

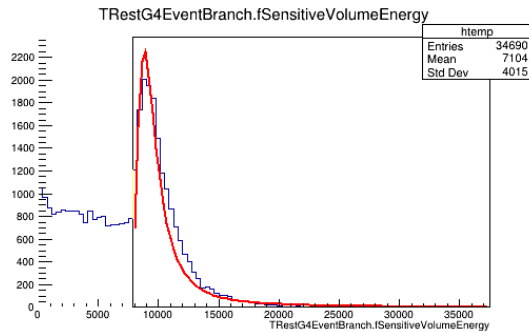


Figura 8: Energía depositada en el volumen del detector utilizando como este un plástico centelleador (BC408) con ajuste de Landau.

Una vez se ha comprobado que los datos son coherentes con la teoría, se ha utilizado un visualizador que permite ver los eventos ocurridos individualmente de forma que permite analizar lo ocurrido en cada uno de ellos.

Al interactuar los muones con el detector pueden ocurrir diferentes cosas. En la mayoría de los casos se puede apreciar la traza recta del muón en la que se pueden observar las trazas de ionización producidas por los electrones creados en la ionización primaria debida al paso de un muón por el material (figura 9, visualizador `REST_ViewTrackEvent`). Si una de las trazas creadas hiciera que la traza del muón no continuara el proceso físico ocurrido en este caso sería el decaimiento de un muón.

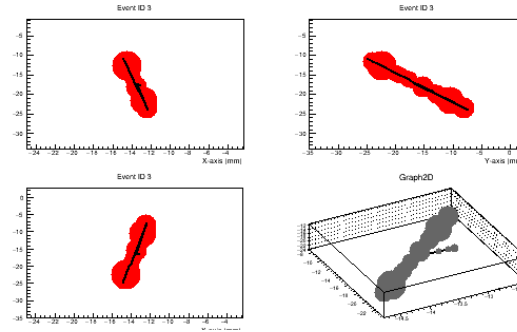


Figura 9: Visualización el evento 1 en formato `TRestTrackEvent` donde se observa una única traza larga y recta, característica del muón.

En otras ocasiones se puede apreciar la traza del muón. Este es el caso de un electrón que ha sufrido el efecto bremsstrahlung y el fotón emitido vuelve a interactuar en el material produciendo un electrón primario, que, a su vez, creará la traza de ionización (figura 10 visualizador `REST_ViewTrackEvent`).

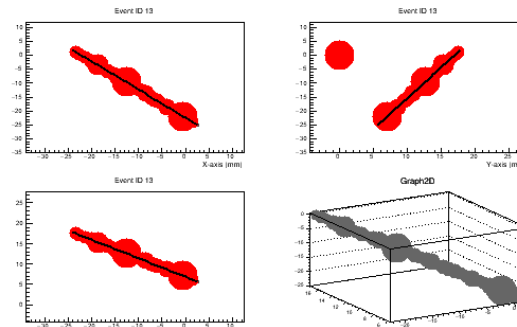


Figura 10: Visualización del evento 5 en formato `TRestTrackEvent` donde se observan 2 trazas. La más pequeña puede deberse ala emisión de un rayos X o a un fotón producido por efecto bremsstrahlung.

Además, pueden existir ocasiones donde se visualice más de una traza. En esos casos el programa dibuja con distintos colores las trazas obtenidas. El visualizador `REST_ViewG4Event()` en 3 dimensiones, permite ver desde todos los ángulos el evento ocurrido en formato `TRestG4Event` (figura 11).

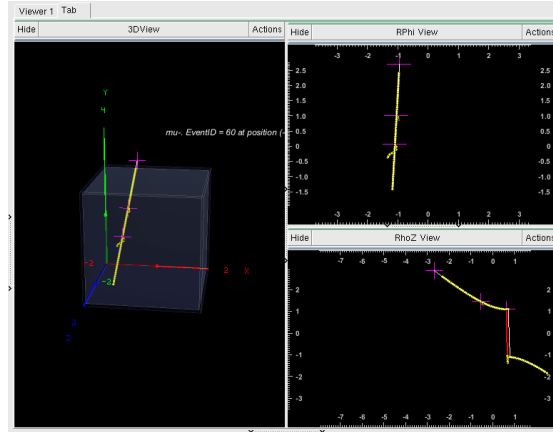


Figura 11: Evento 18 en formato TRestG4Event. Se aprecia una única traza de ionización (en amarillo) y se marcan los electrones más energéticos de la traza (cruces rosas).

Aparte de poder visualizar todas las cosas anteriores, también existe la posibilidad de obtener una lista en un fichero de texto en la que nos aparecen los isótopos creados en cada una de las simulaciones. Esto se puede conseguir de manera muy sencilla utilizando el siguiente comando en el programa:

```
REST_ListIsotopes("fichero entrada.root","fichero salida.dat")
```

Todos estos ejemplos anteriores se incluyen de manera que luego el alumno pueda realizar en la parte práctica del curso todos ellos e incluso más utilizando diferentes características del medio.

5. Resultados

El resultado de todo este trabajo es la página web creada [1]. En ella se pueden encontrar distintos apartados.

Se inicia la página exponiendo los objetivos del módulo educativo (figura 12). En la parte superior de la página se encuentran distintos apartados. Estos se recomiendan ver y realizar en el orden expuesto, ya que han sido pensados y desarrollados de tal manera que vayan guiando al estudiante.

Primero se encuentra la teoría (figura 13) dónde, mediante diferentes documentos, se explican los rayos cósmicos, los muones y la detección de ambos. Además, como suplemento, también se incluye un enlace a vídeo con el fin de que, más interactivamente, queden claros los conceptos.

Tras aprender la teoría llega la parte práctica (figura 14). Aquí se exponen varios documentos. En el primero se describe en qué consiste el entorno RestSoft además de explicar los códigos que se han utilizado para realizar las posteriores simulaciones así como diferentes directrices para realizar cambios en los mismos.



Objetivos:

- - Iniciar al alumno en el conocimiento de rayos cósmicos y muones

Figura 12: Captura de pantalla de la página principal del módulo.



Figura 13: Captura de pantalla de la página de teoría del módulo.

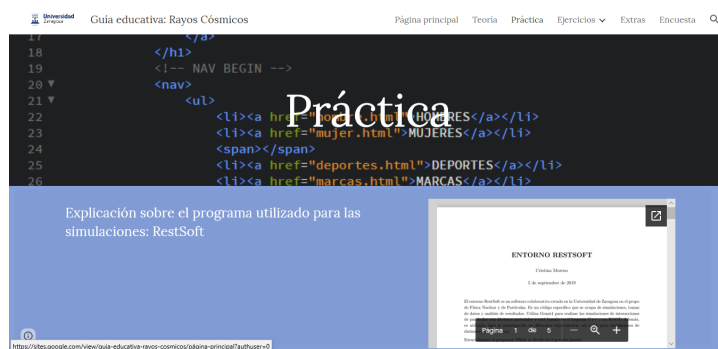


Figura 14: Captura de pantalla de la página de práctica del módulo.

En el siguiente documento se realiza una breve explicación sobre los programas Geant4 y ROOT. Este documento realmente no es necesario para el estudiante a la hora de realizar las simulaciones, pero se ha pensado que de esta manera queda más claro con qué se está trabajando.

En el siguiente y último documento explicativo, se expone de forma detallada los pasos a seguir tanto para realizar las simulaciones como para analizarlas. Se ha incluido este documento como anexo. En él se explican los comandos concretos a utilizar en el programa y también se han incluido capturas de pantalla de este. Es decir, en este documento se puede visualizar los comandos utilizados, las gráficas obtenidas y opciones de visualización de las simulaciones, como por ejemplo las simulaciones en 3 dimensiones.

En esta sección (figura 15), se han añadido también tres archivos con los códigos completos explicados en uno de los documentos anteriores. Así como un enlace donde se pueden observar los poderes de frenado de los muones para distintos materiales y un archivo con una ampliación sobre cómo escribir códigos en RestSoft para el alumno que esté interesado en este aspecto.

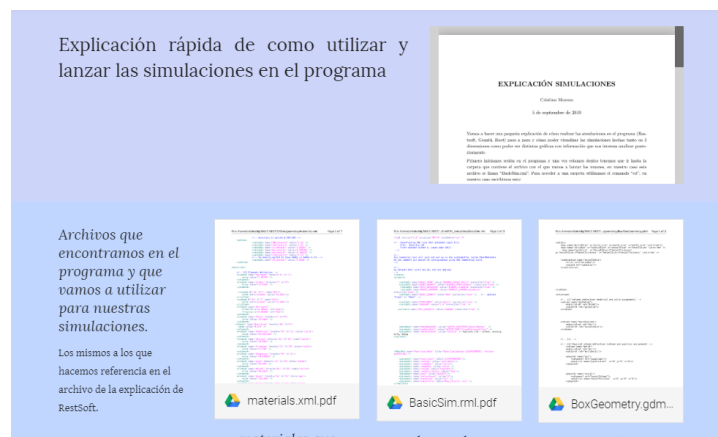


Figura 15: Captura de pantalla del test de teoría del módulo.

En la siguiente sección, “Ejercicios”, se hacen unas propuestas de ejercicios para poner en uso lo explicado en la parte de práctica. Mediante estos ejercicios se pretende que queden aclaradas todas las dudas surgidas a la hora de realizar las simulaciones. Además, para poder comprobar que los resultados obtenidos han sido los correctos, se debe entender el fundamento teórico de los muones, lo que se espera que afiance los conceptos expuestos en la parte de teoría de muones.

Tras la realización de estos ejercicios prácticos, se ha creado una sección que contiene un test de 22 preguntas de teoría (figura 16). El alumno podrá realizarlo y comprobar las respuestas falladas. Este test se ha hecho con el fin de que el propio alumno sea consciente de lo aprendido y de lo que le convendría volver a repasar.

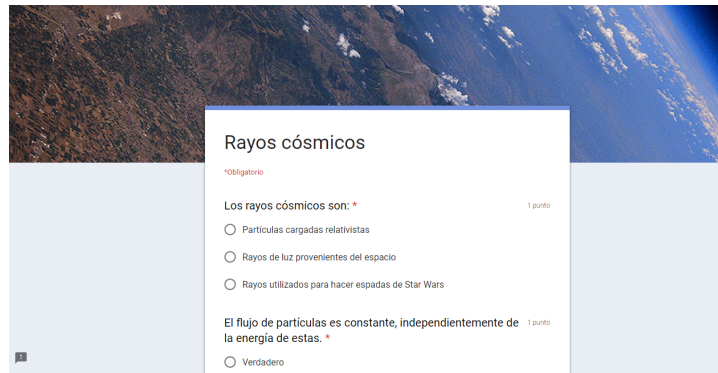


Figura 16: Captura de pantalla del test de teoría del módulo.

Hasta este punto sería la parte importante del módulo pero me pareció conveniente añadir un apartado con unos extras. Al mismo tiempo que uno busca información sobre rayos cósmicos, muones y la detección sobre los mismos, encuentra muchos proyectos muy interesantes que se están realizando hoy en día sobre estos temas. Se han añadido distintos enlaces tanto a diferentes proyectos como a podcasts o páginas explicativas sobre cómo crear cámaras de niebla caseras, por ejemplo (figura 17).

No es necesaria la lectura de todos estos proyectos para la comprensión ni cumplimiento de los objetivos del módulo, pero sí que da al alumno una visión de la parte práctica en el mundo real de los conceptos adquiridos. Esto puede ser beneficioso, ya que, descubrir que el tiempo invertido en el aprendizaje de algo tiene muchos modos prácticos de aplicación siempre es gratificante.

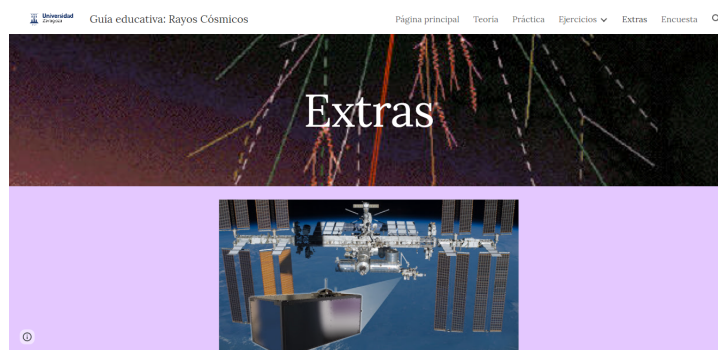


Figura 17: Captura de pantalla de la página de extras del módulo.

Como último apartado se ha creado un test de evaluación. Este es el primer módulo educativo que se crea en la universidad por lo que se ha creído conveniente realizar un cuestionario en el que los alumnos puedan dar su opinión sobre el módulo. Sería ideal que toda persona que realice el módulo termine rellenando este cuestionario ya que este test se ha hecho con el fin de poder mejorar en un futuro esta primera versión.

6. Conclusiones

La idea principal de este trabajo, en lugar de hacer un estudio sobre un problema concreto en el campo de la física, como es común en un trabajo de fin de grado, era crear una herramienta nueva de la que no se ha hecho uso hasta ahora en el grado con el fin de que luego pueda ser utilizada por alumnos del mismo.

Es un proyecto innovador, que puede presentar desventajas como posibles aprendizajes incompletos o superficiales o problemas con el ordenador o simulaciones que requieran la intervención de un profesor entre otros. Aun así, se cree y espera que tenga muchas más ventajas que inconvenientes proporcionando una nueva forma de aprendizaje que pueda incluirse en el estudio de la física.

Es el primer módulo educativo creado en el grado de física por lo que, de momento, será público y se podrá hacer uso de todo excepto de la parte práctica. Es decir, para poder realizar las simulaciones explicadas se debe tener acceso a un ordenador que tenga instalado RestSoft, software que todavía no es público. Lo que implica que, de momento, únicamente alumnos en la Universidad de Zaragoza podrán hacer uso de él.

El objetivo posterior es crear varios módulos como este y crear una página web que contenga a todos ellos incluyendo un programa independiente. De manera que cualquiera pueda utilizarlo sin necesidad de tener que pertenecer a la Universidad de Zaragoza y poder tener acceso a RestSoft.

Lo que se ha hecho en este trabajo ha sido familiarizarse a manejar el software especializado, lanzar simulaciones y recoger datos además de aprender a diseñar la página web en un ámbito educativo. Además, se ha tenido que estudiar toda la teoría expuesta.

Por ello, el objetivo ha sido crear el módulo. Esto conlleva a que no ha habido tiempo para ponerlo en práctica lo que implica que no se sabe todavía si es tan efectivo como se desea y cumple con los objetivos expuestos. Tendríamos que esperar al menos un curso o dos para comprobar y preguntar a los alumnos su opinión sobre ello. Con ese propósito se ha realizado al final del módulo una evaluación, con el objetivo de poder mejorar este tipo de enseñanza y aprendizaje.

Referencias

- [1] Cristina Moreno. *Guía didáctica: Rayos cósmicos*. URL: <https://sites.google.com/view/guia-educativa-rayos-cosmicos>.
- [2] Pere Marqués Graells. *Ventajas e inconvenientes del multimedia educativo*. 203. URL: <http://peremarques.net/ventajas.html>.
- [3] Manuel Aguilar Benitez. “Cien años de rayos cósmicos”. En: *XIII Programa de la cultura Científica y Tecnológica* 105 (2011), págs. 107-128.
- [4] Michael Hellgardt y Sourav Kundu. “Spatium”. En: *CAAD futures 1997* 11 (1997), págs. 83-96. DOI: 10.1007/978-94-011-5576-2_6.
- [5] Randy Russel. *Estrellas Neutrónicas*. 2008. URL: https://www.windows2universe.org/the_universe/NS.html&lang=sp.
- [6] *Rayos cósmicos galácticos y remanentes de supernovas*. 2019. URL: http://www01.nmdb.eu/public_outreach/es/01_gcr/.
- [7] Luis Manuel Villaseñor Cendejas. *Rayos Cósmicos: Detectando las partículas más energéticas del Universo*. URL: <https://studylib.es/doc/195026/rayos-cosmicos--detectando-las-particulas-masenergeticas....>
- [8] Agencia Espacial Europea. *Cosmic rays*. URL: http://esamultimedia.esa.int/multimedia/edu/Cosmic_Rays.swf.
- [9] ITeDA. *¿Qué son los rayos cósmicos?* URL: <http://www.iteda.cnea.gov.ar/?q=node/28>.
- [10] Francisco R. Villatoro. *El misterio de los muones ultraenergéticos de los rayos cósmicos*. 2016. URL: <https://francis.naukas.com/2016/11/10/el-misterio-de-los-muones-en-los-rayos-cosmicos/>.
- [11] D. Groom Klein S. (Particle Data Group). “Passage of particle through matter”. En: (2011). URL: <http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-passage-particles-matter.pdf>.
- [12] D.E. Groom N.V. Mokhov y S. Striganov. “Muon Stopping Power and Range”. En: *Atomic Data and Nuclear Data Tables* 76.2 (2001).
- [13] M. Tanabashi et al. (Particle Data Group). “RPP-33. Passage of Particles Through Matter”. En: *Physical Review D* 98 (2018), pág. 030001. URL: <http://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-passage-particles-matter.pdf>.
- [14] Cooly Fooly. *Cómo funciona la cámara de niebla*. 2010. URL: <https://naukas.com/2010/07/09/como-funciona-una-camara-de-niebla/>.

- [15] Francisco Barradas. *La cámara de niebla. Partículas de verdad*. URL: <http://rincondelaciencia.educa.madrid.org/practica2/pr-78/pr-78.html>.
- [16] Steven Dufrense. *Make a cheap muon detector using cosmicwatch*. 2017. URL: <https://hackaday.com/2017/11/27/make-a-cheap-muon-detector-using-cosmicwatch/>.
- [17] CERN. *International Masterclasses, Hands on Particle Physics*. URL: <https://physicsmasterclasses.org/exercises/ATLAS/es/index.htm>.
- [18] *IceCube*. URL: <https://icecube.wisc.edu/science/highlights>.
- [19] M. Olmo R. Nave. *Radiación Cherenkov*. URL: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Relativ/einvel.html>.
- [20] *Premio Nobel de Física 2015*. URL: <https://fisquiweb.es/PNob/PNobF15.html>.
- [21] J Galan. “REST Framework . The restG4 package Definning simulation conditions and geometry”. En: (2016).
- [22] CERN. *ROOT*. 2018. URL: <https://root.cern.ch/about-root>.
- [23] Héctor Alvarez Pol. *An introduction to Geant4*. URL: <http://fpsalmon.usc.es/genp/doc/escuela/seminarios/transparencias/G4IntroEnglish.pdf>.
- [24] Particle Data Group. URL: pdg.lbl.gov/2018/AtomicNuclearProperties/.
- [25] J Galan. “REST Framework general description”. En: (2016).
- [26] J.J. Beatty J. Matthews S.P. Wakely (Particle Data Group). *Passage of particles through matter*. 2019. URL: <http://pdg.lbl.gov/2019/reviews/rpp2018-rev-cosmic-rays.pdf>.
- [27] Gloria Luzón y col. En: *Proyectos de Innovación docente de la UZ, PII-DUZ_18_363* ().

A. Códigos utilizados

Parte de código del archivo de materiales.

```
<!-- densities in mg/cm3 @ 293.15K -->
<define>
  <variable name="TMA_density" value="2.42" />
  <variable name="ISO_density" value="2.51" />
  <variable name="Ar_density" value="1.66201" />
  <variable name="Ne_density" value="0.838505" />
  <variable name="He_density" value="0.166322" />
  <variable name="CF4_density" value="3.72" />
  <!-- Xe density mg/cm3 to have 200Kg in PANDA X-III -->
  <variable name="Xe_density" value="5.6588" />
</define>

<materials>

  <!-- {{{ Elements definition -->
  <element name="Hydrogen" formula="H" Z="1">
    <atom value="1.00794" />
  </element>
  <element name="Carbon" formula="C" Z="6">
    <atom value="12.0107" />
  </element>

  <isotope N="14" Z="7" name="N14">
    <atom unit="g/mole" value="14.0031"/>
  </isotope>
  <isotope N="15" Z="7" name="N15">
    <atom unit="g/mole" value="15.0001"/>
  </isotope>
  <element name="Nitrogen">
    <fraction n="0.99632" ref="N14"/>
    <fraction n="0.00368" ref="N15"/>
  </element>
  <element name="Fluor" formula="F" Z="9">
    <atom value="18.9984" />
  </element>
  <element name="Beryllium" formula="Be" Z="4">
    <atom value="9.012" />
  </element>
  <element name="Aluminium" formula="Al" Z="13" state="solid">
    <atom value="26.9815385" />
  </element>
  <element name="Silicon" formula="Si" Z="14" state="solid">
    <atom value="28.0855" />
  </element>
  <element name="Chromium" formula="Cr" Z="24" state="solid">
    <atom value="51.996" />
  </element>
  <element name="Manganese" formula="Mn" Z="25">
    <atom value="54.938045" />
  </element>
  <element name="Iron" formula="Fe" Z="26" state="solid">
    <atom value="55.845" />
  </element>
  <element name="Nickel" formula="Ni" Z="28" state="solid">
    <atom value="58.6934" />
  </element>
  <element name="Xenon" formula="Xe" Z="54" state="gas">
    <atom value="131.293" />
  </element>
  <element name="Argon" formula="Ar" Z="18" state="gas">
    <atom value="39.948" />
  </element>
  </element>
```



```

<element name="Boron" formula="B" Z="5" state="solid">
  <atom value="10.811" />
</element>

<!-- }}} -->

<!-- {{{ Quenchers -->
<material name="TMA" state="gas">
  <D unit="mg/cm3" value="targetGasPressure*TMA_density" />
  <T unit="K" value="targetGasPressure" />
  <P unit="bar" value="targetGasPressure" />
  <composite n="3" ref="Carbon" />
  <composite n="9" ref="Hydrogen" />
  <composite n="1" ref="Nitrogen" />
</material>

<material name="isobutane" state="gas">
  <D unit="mg/cm3" value="targetGasPressure*ISO_density" />
  <T unit="K" value="targetGasPressure" />
  <P unit="bar" value="targetGasPressure" />
  <composite n="4" ref="Carbon" />
  <composite n="10" ref="Hydrogen" />
</material>

<!-- }}} -->

<!-- {{{ Gas mixtures -->
<material name="CF4" state="gas">
  <D unit="mg/cm3" value="targetGasPressure*CF4_density" />
  <T unit="K" value="targetGasPressure" />
  <P unit="bar" value="targetGasPressure" />
  <composite n="1" ref="Carbon" />
  <composite n="4" ref="Fluor" />
</material>
<material name="PureXenon" state="gas">
  <T unit="K" value="targetGasTemperature"/>
  <P unit="bar" value="targetGasPressure"/>
  <MEE unit="eV" value="482"/>
  <D unit="mg/cm3" value="Xe_density*targetGasPressure"/>
  <fraction n="1" ref="Xenon"/>
</material>

<material name="Xenon_TMA" state="gas">
  <D unit="mg/cm3" value="targetGasPressure*(TMA_density*quencherFraction
+Xe_density*1)" />
  <P unit="bar" value="targetGasPressure" />
  <T unit="K" value="targetGasTemperature" />
  <fraction n="quencherFraction" ref="TMA" />
  <fraction n="1-quencherFraction" ref="Xenon" />
</material>

<material name="PureArgon" state="gas">
  <T unit="K" value="targetGasTemperature"/>
  <P unit="bar" value="targetGasPressure"/>
  <MEE unit="eV" value="188"/>
  <D unit="mg/cm3" value="Ar_density*targetGasPressure"/>
  <fraction n="1" ref="Ar"/>
</material>

<material name="Ar_ISO" state="gas">
  <D unit="mg/cm3" value="targetGasPressure*(ISO_density*quencherFraction

```

```

+Ar_density*(1-quencherFraction))" />
    <P unit="bar" value="targetGasPressure" />
    <T unit="K" value="targetGasTemperature" />
    <fraction n="quencherFraction" ref="isobutane" />
    <fraction n="1-quencherFraction" ref="Argon" />
</material>

<!-- }}} -->

<!-- {{{ Copper -->
<isotope N="63" Z="29" name="Cu63">
    <atom unit="g/mole" value="62.9296"/>
</isotope>
<isotope N="65" Z="29" name="Cu65">
    <atom unit="g/mole" value="64.9278"/>
</isotope>
<element name="Cu">
    <fraction n="0.6917" ref="Cu63"/>
    <fraction n="0.3083" ref="Cu65"/>
</element>
<material name="Copper" state="solid">
    <MEE unit="eV" value="322"/>
    <D unit="g/cm3" value="8.96"/>
    <fraction n="1" ref="Cu"/>
</material>
<!-- }}} -->

<!-- {{{ Stainlesssteel -->
<material name="StainlessSteel" state="solid">
    <MEE unit="eV" value="280.927567486627"/>
    <D unit="g/cm3" value="8.02"/>
    <fraction n="0.02" ref="Manganese"/>
    <fraction n="0.01" ref="Silicon"/>
    <fraction n="0.19" ref="Chromium"/>
    <fraction n="0.1" ref="Nickel"/>
    <fraction n="0.68" ref="Iron"/>
</material>
<!-- }}} -->

<!-- {{{ Beryllium -->
<material name="Beryllium" state="solid">
    <MEE unit="eV" value="63.7"/>
    <D unit="g/cm3" value="1.848"/>
    <fraction n="1" ref="Beryllium"/>
</material>
<!-- }}} -->

<!-- {{{ C13 -->
<isotope N="13" Z="6" name="iC13">
    <atom unit="g/mole" value="13"/>
</isotope>

<element name="eC13">
    <fraction n="1" ref="iC13"/>
</element>

<material name="C13" state="solid">
    <D unit="g/cm3" value="2.45"/>
    <fraction n="1" ref="eC13"/>

```

Código donde se ha creado la geometría utilizada.

```
<solids>
  <box name="WorldSolid" x="world_size" y="world_size" z="world_size" lunit="mm"/>
  <box name="SolidBox" x="VesselXSize" y="VesselYSize" z="VesselZSize" lunit="mm" />
  <box name="gasSolid" x="VesselXSize-2*VesselThickness"
y="VesselYSize-2*VesselThickness" z="VesselZSize-2*VesselThickness" lunit="mm" />

  <subtraction name="VesselSolid">
    <first ref="SolidBox"/>
    <second ref="gasSolid"/>
  </subtraction>

</solids>

<structure>

  <!-- {{{ Volumes definition (material and solid assignment) -->
  <volume name="gasVolume">
    <materialref ref="BC408"/>
    <solidref ref="gasSolid"/>
  </volume>

  <volume name="VesselVolume">
    <materialref ref="Air"/>
    <solidref ref="VesselSolid"/>
  </volume>

  <!-- }}} -->

  <!-- {{{ Physical volume definition (volume and position assignment) -->
  <volume name="World">
    <materialref ref="Air"/>
    <solidref ref="WorldSolid"/>

    <physvol name="gas">
      <volumeref ref="gasVolume"/>
      <position name="gasPosition" x="0" y="0" z="0"/>
    </physvol>

    <physvol name="vessel">
      <volumeref ref="VesselVolume"/>
      <position name="VesselPosition" x="0" y="0" z="0"/>
    </physvol>

  </volume>

</structure>
```

```
</volume>
<!-- }}} -->
</structure>
```

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?>

<!DOCTYPE gdml [
<!ENTITY geometry SYSTEM "BoxGeometry.gdml">
<!ENTITY materials SYSTEM "../materials.xml">
]>

<gdml xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="http://service-spi.web.cern.ch/service-spi/app/
releases/GDML/schema/gdml.xsd">

  <!-- Just an example of a simple box geometry file : BoxSetup.gdml
  This file just defines de parameters of the geometry.
  The geometry it is defined in geometry/BoxGeometry.gdml
  The materials are defined in geometry/materials.xml
  Author : G. Luzon    Date :Nov-2016
  -->

  <!-- All values should be in mm -->

  <define>
    <constant name="world_size" value="70" />
    <!-- The TPC gas target -->
    <variable name="targetGasDensity" value=""/> <!-- 3.72 mg/cm3 (This density
corresponds to ~ 192g in vessel volume of ~ 12,5x50x50 cm3) -->
    <!-- <variable name="quencherDensity" value="0.254"/> mg/cm3 (Corresponds to
1% TMA) -->
    <variable name="quencherFraction" value="0.00"/>
    <variable name="targetGasTemperature" value="300"/> <!-- K -->
    <variable name="targetGasPressure" value="1"/> <!-- bar -->

    <!-- The vessel definitions -->

    <constant name="VesselThickness" value="1" />    <!--in mm's -->
    <constant name="VesselXSize" value="50" />

    <constant name="VesselZSize" value="50" />
    <constant name="VesselYSize" value="50"/>

  </define>

  &materials;

  &geometry;

  <setup name="Default" version="1.0">
    <world ref="World"/>
  </setup>

</gdml>
```

Código mediante el cual se lanza la simulación

```

<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no" ?>

<!-- Constructing XML-like REST metadata input file
      File : BasicSim.rml
      First concept author G. Luzon (Apr-2017)
-->

<!--
Any commented text will just not end up in the configBuffer inside TRestMetadata
We can comment out pieces of configuration using XML commenting style.
-->

<!--
By default REST units are mm, keV and degrees
-->
<restG4>
<globals>

    <variable name="BASIC_PATH" value="${HOME}/BASIC-REST/" overwrite="true" />
    <variable name="BASIC_G4PATH" value="${BASIC_PATH}/G4Sim/" overwrite="true" />
    <variable name="REST_DATAPATH" value="${HOME}/simData" overwrite="true" />
    <variable name="BASIC_GEOPATH" value="${BASIC_G4PATH}/geometry"
overwrite="true" />
    <variable name="BASIC_GEODIR" value="Box" overwrite="true" />    <!-- options
"Argon" or "Neon" -->

    <variable name="EXPERIMENT" value="Basic" overwrite="true" />
    <variable name="VERSION" value="1.0" overwrite="true" />

    <variable name="REST_NEVENTS" value="100000" overwrite="true" />


    <parameter name="mainDataPath" value="${REST_DATAPATH}/Basic/Muons/" />
    <parameter name="gasDataPath" value="${REST_PATH}/inputData/gasFiles/" />
    <parameter name="verboseLevel" value="warning" /> %options are : silent, warning,
info, debug
</globals>


<TRestRun name="Muon Simulaton" title="Muon Simulations ${EXPERIMENT}. Version
${VERSION}.">

    <parameter name="experiment" value="${EXPERIMENT}"/>
    <parameter name="runType" value="simulation"/>
    <parameter name="runNumber" value="auto"/>
    <parameter name="readOnly" value="false" />
    <parameter name="runTag" value="Template"/>
    <parameter name="runDescription" value="Test"/>
    <parameter name="user" value="${USER}"/>
    <parameter name="verboseLevel" value="0"/>
    <parameter name="overwrite" value="off" />
    <parameter name="outputFile" value="Muon_Plastic.root" />
</TRestRun>

```



```

<TRestG4Metadata name="restG4 Simulation run" title="Muon simulation">
  <parameter name="geometryPath" value="${BASIC_GEOPATH}/${BASIC_GEODIR}" />
  <parameter name="gdm1_file" value="Setup.gdm1"/>
  <parameter name="maxTargetStepSize" value="1" units="mm" />
  <parameter name="subEventTimeDelay" value="0" units="s" />

  <!-- A member to store the component activity (and mass) are now present in
G4Metadata -->
  <parameter name="activity" value="1" />
  <parameter name="mass" value="0.000001" />

  <!-- The number of events to be simulated is now defined in TRestG4Metadata -->
  <parameter name="Nevents" value="${REST_NEVENTS}" />

  <generator type="virtualWall" position="(0,27,0)mm" size="10cm"
rotation="(90,0,0)" >
    <source particle="mu-" >
      <energyDist type="TH1D" file="${REST_PATH}/data/distributions/Muons.root"
spctName="cosmicmuon" />
      <angularDist type="TH1D" file="${REST_PATH}/data/distributions/
CosmicAngles.root" spctName="Theta2" />
    </source>
  </generator>

  <storage sensitiveVolume="gas">
    <parameter name="energyRange" value="(0,100)" units="MeV" />
    <activeVolume name="gas" chance="1" />
    <activeVolume name="vessel" chance="1" />
    <!-- <activeVolume name="shield1" chance="1" /> used for shielded geometry-->
    <!-- <activeVolume name="shield2" chance="1" /> <!-- used for shielded
geometry-->

  </storage>

</TRestG4Metadata>

<TRestPhysicsLists name="default" title="First physics list implementation."
verboseLevel="debug" >
  <parameter name="cutForGamma" value="1" units="mm" />
  <parameter name="cutForElectron" value="1" units="mm" />
  <parameter name="cutForPositron" value="1" units="mm" />

  <parameter name="cutForMuon" value="1" units="mm" />
  <parameter name="cutForNeutron" value="1" units="mm" />
  <parameter name="minEnergyRangeProductionCuts" value="1" units="keV" />
  <parameter name="maxEnergyRangeProductionCuts" value="1" units="GeV" />

  <!-- EM Physics lists -->
  <!-- <physicsList name="G4EmLivermorePhysics"> </physicsList>-->
  <!-- <physicsList name="G4EmPenelopePhysics"> </physicsList> -->

```

```
<physicsList name="G4EmStandardPhysics_option3"> </physicsList>
<!-- Decay physics lists -->
<physicsList name="G4DecayPhysics"> </physicsList>
<physicsList name="G4RadioactiveDecayPhysics"> </physicsList>
<physicsList name="G4RadioactiveDecay">
  <option name="ICM" value="true" />
  <option name="ARM" value="true" />
</physicsList>

<!-- Hadron physics lists -->
<physicsList name="G4HadronElasticPhysicsHP"> </physicsList>
<physicsList name="G4IonBinaryCascadePhysics"> </physicsList>
<physicsList name="G4HadronPhysicsQGSP_BIC_HP"> </physicsList>
<!-- <physicsList name="G4NeutronTrackingCut"> </physicsList> -->
<physicsList name="G4EmExtraPhysics"> </physicsList>

</TRestPhysicsLists>

</restG4>
```